

人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响

王维奇^{1,2,3}, 曾从盛^{1,2,3*}, 钟春棋⁴, 全川^{1,2,3}

(1. 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福州 350007; 2. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007; 3. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 4. 漳州市环境科学研究所, 漳州 363000)

摘要:为了阐明湿地土壤生态化学计量学特征对人类干扰的响应,对闽江河口湿地受到人类不同程度干扰的芦苇沼泽、草地、滩涂养殖地、耕地、池塘养殖地和干扰恢复的弃耕地土壤的碳、氮、磷生态化学计量学特征进行了测定与分析.结果表明,土壤C/N、C/P和N/P比均表现出随着干扰程度的增大而降低,即轻度干扰的芦苇沼泽和草地(25.53、156.06、6.11和27.58、158.99、5.78) > 中度干扰的滩涂养殖地(25.02、96.90、3.87) > 高度干扰的耕地和池塘养殖地(17.55、46.19、2.65和22.30、57.51、2.62);与高度干扰的耕地相比,干扰恢复的弃耕地土壤C/N、C/P和N/P比有所提高(19.95、63.81和3.18);影响土壤C/N、C/P和N/P比的因子随干扰程度的变化而改变;土壤C/N比表现出随着干扰程度和土壤深度的变化相对较小,C/P和N/P比的变异性相对较大;碳与养分比对土壤碳储量具有良好的指示作用.

关键词:碳;氮;磷;化学计量学;人类干扰;闽江河口

中图分类号:X171 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)10-2411-06

Effect of Human Disturbance on Ecological Stoichiometry Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Minjiang River Estuarine Wetland

WANG Wei-qi^{1,2,3}, ZENG Cong-sheng^{1,2,3}, ZHONG Chun-qi⁴, TONG Chuan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 4. Zhangzhou Academy of Environmental Science Institute, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: To clarify responses of soil ecological stoichiometry in wetland to human disturbance, the ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus elements of soil in *Phragmites australis* marsh, grassland, flat breed aquatics, cropland, pond aquaculture after human disturbance and abandoned cropland after human disturbance restoration in Minjiang River estuary were analyzed. The results showed: averaged values of C/N, C/P, N/P ratios were declined as the human disturbance increment, which appeared that *Phragmites australis* marsh, grassland (lower human disturbance, 25.53, 156.06, 6.11 and 27.58, 158.99, 5.78) were bigger than flat breed aquatics (medium human disturbance, 25.02, 96.90, 3.87), and flat breed aquatics (medium human disturbance) were bigger than cropland, pond aquaculture (higher human disturbance, 17.55, 46.19, 2.65 and 22.30, 57.51, 2.62). Compared with cropland, C/N, C/P, N/P ratios in abandoned cropland (human disturbance restoration) were (19.95, 63.81, 3.18) higher. The influencing factors were changed with the human disturbance intensity. Soil C/N ratios showed relatively small variation between different human disturbance and soil depth, while C/P and N/P ratios showed a high heterogeneity. The ratio of carbon to nutrition had preferable indication for carbon storage.

Key words: carbon; nitrogen; phosphorus; stoichiometry; human disturbance; Minjiang River estuary

生态化学计量学主要探究生物系统能量和多种元素的平衡^[1],是当今研究的热点问题^[2,3].其中,关于碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量学的研究最多,主要是因为氮和磷是生物生长的限制性养分^[4],碳是结构性物质^[5],三者密切相关.此外,其研究意义还在于碳、氮、磷的生态化学计量学特征具有良好的指示作用,可作为预测有机质分解速率和养分限制性的重要指标^[6].

国外对生态化学计量学的研究相对较多^[1,7,8],

目前,我国学者对该学科的关注则相对不足,已有研究成果除生态化学计量学综述外^[6,9,10],主要是对植物碳、氮、磷生态化学计量学特征的一些研究^[11~14],关于土壤碳、氮、磷的生态化学计量学研究相对较

收稿日期:2009-12-14;修订日期:2010-02-02

基金项目:国家自然科学基金项目(40671174);福建省自然科学基金项目(2010J01139);福建省科技计划重点项目(2009R10039-1);福建省教育厅资助项目(JA08051, JB09042);福建师范大学地理学院旗山学者项目

作者简介:王维奇(1982~),男,硕士,研究实习员,主要研究方向为湿地生物地球化学循环,E-mail: wangweiqi15@163.com

* 通讯联系人, E-mail: czeng@fjnu.edu.cn

少^[15,16],土壤碳、氮、磷生态化学计量学的研究,对揭示土壤中养分的可获得性以及碳、氮、磷元素的循环和平衡机制具有重要意义。

当今社会经济的快速发展使人类对各类自然生态系统的干扰程度不断增强,这将对其下土壤中碳、氮、磷等生源要素的生物地球化学过程产生深刻的影响,生态化学计量学正是反映这种变化的表观性指标,但相关研究鲜见报道。土壤碳、氮、磷元素比是否会随着干扰程度的升高而降低,碳与养分比对土壤碳固定有怎样的指示作用?深入地探讨这些问题,可为国家采取有效地方式增加土壤固碳潜力,减缓温室气体排放提供决策依据。

河口湿地是河流与海洋相互作用的结果,我国海岸线漫长,入海河流众多,其发育较为典型。其地处滨海地区,一般经济较发达,受到人类的干扰也高于其他生态系统。针对当前尚未开展人类干扰对湿地生态系统土壤碳、氮、磷等生源要素的生态化学计量学特征的影响研究,笔者对闽江河口湿地不同干扰程度下的土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征作一探讨,明确人类干扰对土壤碳、氮、磷比的影响,揭示碳与养分比特征与碳固定的联系,阐明随着干扰程度和土壤剖面深度的改变,该比值的变化范围对促进元素生态化学计量学理论的发展和完善具有重要的意义,也可为湿地生态系统的保护与恢复提供重要参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

选取闽江河口鱣鱼滩湿地不同程度人类干扰的土壤类型为研究对象,区内气候暖热湿润,年均温 19.3℃,年降水量 1346 mm^[17]。天然植被主要有芦苇 (*Phragmites australis*)、短叶荳蔻 (*Cyperus malaccensis*)、蔗草 (*Scirpus triqueter*) 和近几年入侵的互花米草 (*Spartina alterniflora*) 等。随着社会和经济的快速发展,人类活动对其进行不同程度干扰,在本研究区中,芦苇沼泽和草地(矮小植物组成的杂草地)受到季节性养鸭、放牛和人类捕螃蟹的影响,为轻度干扰;滩涂养殖地主要将芦苇地上部分剪除,常年养殖—鱼,为中度干扰;耕地则受到翻耕和施肥等影响,池塘养殖地则为土壤的深挖,为高度干扰;弃耕地为耕地不再耕作的用地,较少受到人类的干扰,这里作为干扰恢复地。

1.2 土壤样品采集及测定

2007 年 10 月在闽江河口鱣鱼滩对受人类轻度

干扰的芦苇沼泽和草地、中度干扰的滩涂养殖地、高度干扰的池塘养殖地和耕地及干扰恢复的弃耕地进行采样,对每个样区随机挖取 3 个剖面作为重复,每个土壤剖面按 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm 共分 5 层进行采样,装入自封袋带回实验室,去除杂质,经自然风干后过 100 目孔筛,实验待用^[18]。土壤有机碳、全氮和全磷分别采用重铬酸钾外加热法、凯氏定氮法(K-370)和钼锑抗比色法(UV-2450),土壤全盐和 pH 采用电位法测定(DDS-307 型电导仪和奥立龙 868 型酸度计),容重用环刀法进行测定^[19]。并于 2008 年夏季和冬季采用 Li-8100 测定 1 次土壤呼吸。

1.3 数据处理

应用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 统计分析软件对测定数据进行整理。原始数据的平均值及标准偏差的计算采用 Excel 2003,对不同干扰程度下的土壤 C/N、C/P、N/P 比的差异性检验采用 SPSS13.0 的双因素方差分析,环境因子与 C/N、C/P、N/P 比的相关性分析采用 SPSS 13.0 的 Pearson 相关分析。土壤 C/N、C/P、N/P 比采用的是物质的量之比(mol/mol),土壤呼吸数据为夏季和冬季土壤呼吸速率的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同人类干扰程度下土壤碳、氮、磷含量及其相关性

碳、氮、磷是土壤中重要的生源要素。不同干扰程度下土壤的碳、氮、磷元素的变化范围分别为 5.72~61.40、0.47~2.58、0.33~0.91 mg·g⁻¹,平均值为 23.74、1.14、0.62 mg·g⁻¹,变异系数为 56.9%、46.2%、23.9%,碳和氮元素的空间变异性高于磷^[18,20]。本研究对 3 种元素的相互关联性作以分析发现,碳、氮、磷元素间存在着极显著的相关关系($p < 0.01$),其中,碳和氮元素之间呈现良好的线性拟合关系,从斜率看几乎是同步变化,碳和磷、氮和磷之间的线性拟合程度相对较低,且从斜率上看,磷的变化滞后于碳和氮^[15](图 1),这可能与碳和氮是有机质的结构性成分有关。

2.2 人类干扰对土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响

不同干扰程度下 0~50 cm 土壤 C/N 比为 14.20~29.05,平均值为 22.99,变异系数为 17.5%,C/P 比为 38.93~208.70,平均值为 96.58,变异系数为 50.2%,N/P 比为 2.01~7.52,平均值

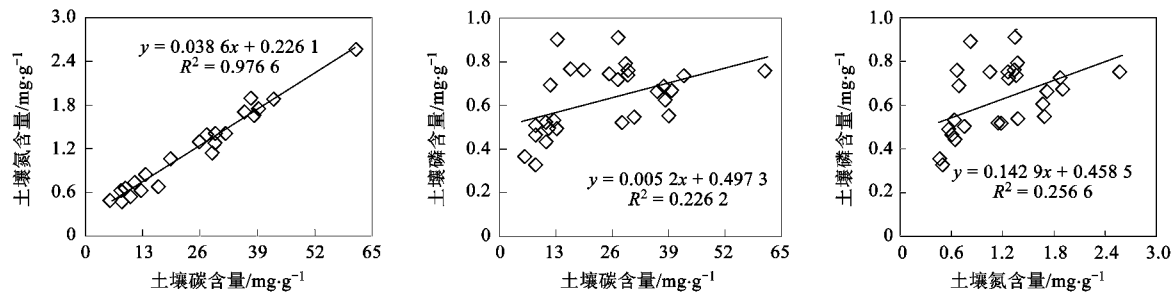


图1 不同干扰程度下土壤碳、氮、磷相关性

Fig. 1 Correlation of soil carbon, nitrogen and phosphorus after different disturbance intensity

为 4.04, 变异系数为 37.7%, 土壤 C/N 比相对稳定, 而 C/P 比和 N/P 比变化较大, 3 种比值均表现为随着干扰程度的增大而降低, 即轻度干扰的芦苇沼泽和草地 (25.53、156.06、6.11 和 27.58、158.99、5.78) > 中度干扰的滩涂养殖地 (25.02、96.90、3.87) > 高度干扰的耕地和池塘养殖地 (17.55、46.19、2.65 和 22.30、57.51、2.62), 与高度干扰的耕地相比, 干扰恢复的弃耕地土壤 C/N、C/P 和 N/P 比有所提高 (19.95、63.81、3.18) (图 2~4), 其中, 土壤 C/N 和 C/P 比最低的耕地比最高的草地分别低了 36.4% 和 70.9%, 而 N/P 比最低的池塘养殖地也比最高的芦苇沼泽降低了 57.1%。统计分析表明, 轻度干扰的芦苇沼泽和草地与中度干扰的滩涂养殖地、高度干扰的耕地和池塘养殖地的 C/P 和 N/P 比之间存在着显著的差异 ($p < 0.05$), C/N 比也与高度干扰的耕地和池塘养殖地之间差异明显 ($p < 0.05$), 而与中度干扰的滩涂养殖地的差异不显著 ($p > 0.05$), 干扰恢复的弃耕地虽然 C/N、C/P 和 N/P 比有所回升, 但与高度干扰的耕地相比, 差异尚未达到显著水平 ($p > 0.05$)。从单一类型的土壤 C/N、C/P 和 N/P 比随着剖面深度的变化来看, C/N 比为耕地和池塘养殖地较芦苇沼泽、草地和滩涂养殖地的变化大, 但波动范围都较小。C/P 比为芦苇沼泽、草地、耕地和弃耕地相对较高, 而 N/P 比为草地、耕地和池塘养殖地变化明显。

2.3 影响土壤碳、氮、磷比变化的其他因子

土壤元素的生态化学计量学特征受到气候、母质、地形和生物等成土因素的影响, 同时还受到人类活动的显著影响, 这里主要从土壤理化性质的角度进行分析。土壤 C/N、C/P、N/P 比除受到各自比例元素的影响外, 还受到土壤 pH、容重、盐度等因子的调控, 不同干扰程度下的土壤元素生态化学计量学特征其影响因素也不一致。由表 1 可知, 除个别样地

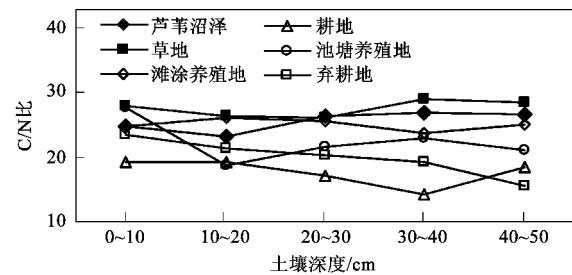


图2 不同干扰程度下土壤 C/N 比动态

Fig. 2 Dynamics of C/N ratios after different disturbance intensity

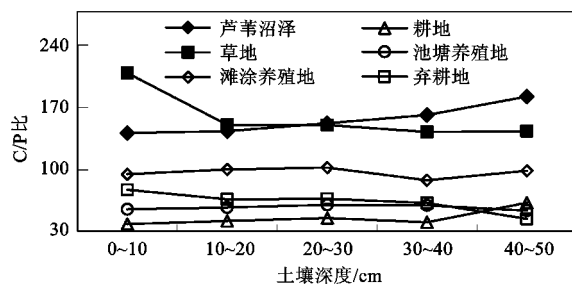


图3 不同干扰程度下土壤 C/P 比动态

Fig. 3 Dynamics of C/P ratios after different disturbance intensity

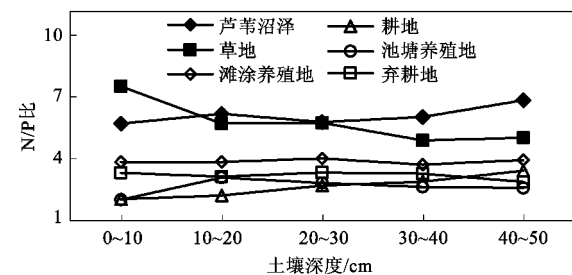


图4 不同干扰程度下土壤 N/P 比动态

Fig. 4 Dynamics of N/P ratios after different disturbance intensity

外, 土壤的碳、氮、磷含量分别对 N/P、C/P 和 C/N 比有重要的影响; 容重调控着轻度干扰的芦苇沼泽和草地的 N/P、C/P 比; 中度干扰的滩涂养殖地土壤

表 1 C/N、C/P 和 N/P 比与影响因子间的相关关系¹⁾

Table 1 Correlation between C/N, C/P and N/P ratios and influencing factors

类型	指标	碳含量	氮含量	磷含量	pH	容重	盐度
芦苇沼泽	C/N 比	—	—	-0.667 **	-0.678 **	0.429	0.767 **
	C/P 比	—	-0.470 *	—	-0.360	0.634 **	0.825 **
	N/P 比	0.374	—	—	0.016	0.552 *	0.559 *
草地	C/N 比	—	—	-0.381	-0.197	0.027	0.425
	C/P 比	—	0.920 **	—	-0.816 **	-0.889 **	-0.117
	N/P 比	0.953 **	—	—	-0.733 **	-0.857 **	-0.261
滩涂养殖地	C/N 比	—	—	-0.073	0.089	-0.230	-0.295
	C/P 比	—	0.473 *	—	-0.209	-0.206	-0.183
	N/P 比	0.612 **	—	—	-0.528 *	-0.154	0.005
耕地	C/N 比	—	—	0.628 **	-0.618 **	-0.508 *	0.534 *
	C/P 比	—	-0.512 *	—	0.617 **	-0.313	-0.031
	N/P 比	-0.800 **	—	—	0.922 **	-0.008	-0.326
池塘养殖地	C/N 比	—	—	0.912 **	-0.748 **	-0.364	-0.011
	C/P 比	—	0.256	—	0.408	0.944 **	-0.720 **
	N/P 比	-0.782 **	—	—	0.711 **	0.563 *	-0.275
弃耕地	C/N 比	—	—	0.811 **	0.231	-0.818 **	0.713 **
	C/P 比	—	0.791 **	—	0.078	-0.707 **	0.657 **
	N/P 比	0.482 *	—	—	-0.400	-0.280	0.325

1) * 表示显著相关($p < 0.05$); ** 表示极显著相关($p < 0.01$); “—”表示存在自相关关系,不宜进行相关分析

的 N/P 比与 pH 显著相关;高度干扰的耕地和池塘养殖地土壤 C/N、C/P、N/P 比受 pH 的影响较为明显;容重和盐度与干扰恢复的弃耕地土壤 C/N、C/P 比呈极显著相关关系。

3 讨论

3.1 人类干扰对土壤碳、氮、磷比的影响

人类活动的干扰对土壤碳、氮、磷元素的储量及循环过程有着深刻地影响,相应的元素比也将发生变化. 本研究中,土壤 C/N、C/P 与 N/P 比随着干扰程度的增大而降低. 其中, C/N 比的降低与随着干扰程度的增大碳损失速率高于氮有关,正如 Chapin 等^[21]所阐述,微生物需要 C/N 比为 25 的基质来满足自身的生长. 但土壤 C/N 比随着干扰程度变化差异不明显(图 2),主要是因为碳、氮元素之间具有紧密的联系且对环境变化的响应几乎是同步的(图 1),这在 Cleveland 等^[15]的研究中也有体现,同时碳和氮作为结构性成分,其积累与消耗过程存在相对固定的比值. 土壤 C/P 与 N/P 比的变化,可认为是随着干扰程度的增大,土壤碳含量和氮含量的损失较快,磷含量的改变则滞后于碳和氮(图 1),具有相对稳定性^[15,16]. 此外,本研究中发现,碳含量和氮含量分别是决定不同程度干扰土壤 C/P 与 N/P 比差异的关键因子($r = 0.943, p < 0.01$; $r = 0.909, p < 0.01$),这与 Tian 等^[16]的结论有所不同,可能与本研究是小尺度研究并叠加了人类干扰有关。

基于土壤碳氮元素变化的良好相关性和 C/N 比相对稳定性,构建土壤 C/N 比数据库,将为更加有效地以土壤碳储量来估算氮储量提供必要手段,同时可减少野外采样和室内分析中较大的工作量。

3.2 土壤碳、氮、磷比的剖面变化特征

碳、氮和磷含量随着土壤深度的增加而改变,那么相应的元素比也将发生变化. 本研究中,虽然不同干扰程度的土壤 C/N、C/P 与 N/P 比随着剖面变化而波动,但从 $\frac{1}{m}$ 来看,变化不大,尤其是土壤 C/N 比,与前人得出的只有土壤表层(0~10 cm)元素比变化较小的结论有所不同^[16],造成这种结果差异的原因可能与对土壤剖面的分层标准有关,本研究采用的分段层标准相对较细且剖面较浅. 此外, Tian 等^[16]研究表明,土壤 0~10 cm C/N、C/P 和 N/P 比显著高于其他土壤层次,本研究对所有采样点数据求平均值,并采用同样的分层标准,得出了与其一致的结论,但就单一类型土壤而言,则有所不同。

为了提高本研究与已有报道中对中国不同气候区土壤 C/N、C/P 和 N/P 比的研究结果的可比性,也将土壤分为 0~10 cm 和 10~50 cm 共 2 层. 本研究的 C/N 比高于全国平均值, N/P 比低于全国平均值(表 2),主要是因为地处亚热带气候区植物生产力高形成的较高的碳含量,而受人类活动干扰等因素的影响形成了相对较低的氮含量, C/P 比的大小关系则是碳、磷元素含量波动变化的综合反映。

表 2 土壤碳、氮、磷含量与比值剖面变化特征¹⁾

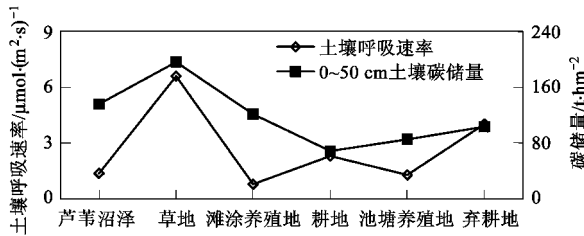
Table 2 Soil carbon, nitrogen, phosphorus and ratios along a gradient of soil depth

土层深度/cm	C/N 比	C/P 比	N/P 比	碳含量/mg·g ⁻¹	氮含量/mg·g ⁻¹	磷含量/mg·g ⁻¹
闽江河口	0~10	24.6	103	4.1	30.59	1.41
	10~50	22.6	95	4.0	22.03	1.08
	0~50	23.6	99	4.1	26.32	1.25
全国 ^[16]	0~10	14.4	136	9.3	24.56	1.88
	10~50	12.3	74	6.1	14.09	1.34
	0~50	13.4	105	7.7	19.33	1.61

1) 表中闽江河口数据是对所有采样点数据求得平均值

3.3 不同干扰程度下土壤碳固定及碳与养分比的指示作用

对不同干扰程度下的土壤碳储量、碳输入途径及土壤呼吸速率进行分析,发现不同干扰程度下的土壤碳的输入输出模式不同(图 5),并认为:①芦苇沼泽为高碳输入-低碳输出,与芦苇较高的生产力,且枯落物完全返还于土壤以及湿地土壤经常处于过湿的水饱和状态,抑制有机质分解有关;②草地是高碳输入-高碳输出,可能是因为该草地由较矮的杂草组成,密度高,碳输入和土壤呼吸也相应增加;③滩涂养殖地是由芦苇沼泽转化而成,芦苇地上部分被割除,养殖[┐]鱼,虽然现有储量较高,但与芦苇沼泽相比,仍然呈下降趋势.碳源主要来自[┐]鱼的排泄物及其残体,表现为低碳输入-低碳输出;④耕地是受人类干扰程度较高的土壤,因经常翻耕、周期性排干和生长季末的收获且无枯落物返还,使其形成了低碳输入-较高碳输出的模式;⑤池塘养殖地虽然受到人类较强的干扰,对土壤进行了深挖,但经过多年的水体悬浮物沉积,表层积累了一定厚度的底泥,大体呈现为低碳输入-低碳输出;⑥弃耕地确切地说是人类干扰后的耕地的恢复地,其上已生长一些杂草,且一般较少水淹,形成了较高碳输入-高碳输出的模式.



图中碳储量数据来源于文献[18]

图 5 不同类型土壤呼吸与碳储量比较

Fig.5 Comparison of the respiration and carbon storage in different soil types

土壤碳、氮、磷比影响着碳的固定^[6].本研究

中,土壤碳与养分比随着干扰程度的增大而减小,其碳储量也不断降低;干扰恢复的弃耕地碳与养分比有所回升,其碳储量也相应提高,可见,高的碳和养分比对土壤碳储量具有良好的指示作用.

4 结论

(1)不同干扰程度下土壤碳和氮元素的空间变异性高于磷,碳和氮元素之间呈现良好的线性拟合关系,碳和磷、氮和磷之间的线性拟合程度相对较低.

(2)闽江河口湿地受到人类不同程度干扰的芦苇沼泽、草地、滩涂养殖地、耕地、池塘养殖地土壤 C/N、C/P 和 N/P 比均表现出随着干扰程度的增大而降低,与高度干扰的耕地相比,干扰恢复的弃耕地土壤 C/N、C/P 和 N/P 比有所提高.

(3)闽江河口湿地土壤 C/N 比表现出随着干扰程度和土壤深度的变化相对较小,C/P 和 N/P 比的变异性相对较大.

致谢:本研究在资料收集过程中得到中国科学院地理科学与资源研究所王绍强老师及其课题组老师的帮助,特别是在论文写作过程中得到中国科学院沈阳应用生态研究所曾德慧老师的指导,在此一并表示深深地感谢.

参考文献:

[1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecol Lett*, 2000, **3** (6):540-550.

[2] Allen A P, Gillooly J F. Towards an integration of ecological stoichiometry and the metabolic theory of ecology to better understand nutrient cycling[J]. *Ecol Lett*, 2009, **12**(5): 369-384.

[3] Amatangelo K L, Vitousek P M. Stoichiometry of ferns in Hawaii: implications for nutrient cycling[J]. *Oecologia*, 2008, **157**: 619-627.

[4] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecol Lett*, 2007, **10**:1135-1142.

- [5] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in nature communities[J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2008, **39**:153-170.
- [6] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, **28**(8): 3937-3947.
- [7] Elser J J, Acharya K, Kyle M, *et al.* Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. *Ecol Lett*, 2003, **6**:936-943.
- [8] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. *J Appl Ecol*, 2003, **40**: 523-534.
- [9] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Application of N:P stoichiometry to ecology studies[J]. *Acta Bot Sin*, 2003, **45**: 1009-1018.
- [10] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(6): 1007-1019.
- [11] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 等. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2007, **27**(3): 947-952.
- [12] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2665-2673.
- [13] 张丽霞, 白永飞, 韩兴国. 内蒙古典型草原生态系统中 N 素添加对羊草和黄囊苔草 N:P 化学计量学特征的影响[J]. *植物学报*, 2004, **46**(3): 259-270.
- [14] Han W, Fang J Y, Guo D, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytol*, 2005, **168**: 377-385.
- [15] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85**: 235-252.
- [16] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2009, doi: 10.1007/s10533-009-9382-0.
- [17] 刘剑秋, 曾从盛, 陈宁. 闽江河口湿地研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 331-334.
- [18] 曾从盛, 钟春棋, 仝川, 等. 土地利用变化对闽江河口湿地表层土壤有机碳含量及其活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(5): 125-129.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学出版社, 2000.
- [20] 曾从盛, 钟春棋, 仝川, 等. 闽江口湿地不同土地利用方式下表层土壤 N、P、K 含量研究[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(3): 87-91.
- [21] Chapin S F III, Matson P, Mooney H A. principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer-Verlag, 2002.